

アルミ電線端子圧着部の腐食挙動と性能への影響

自動車電装R&Dセンター 川口拓也¹・木村陽文¹
材料応用技術・分析センター 深浦圭二²・中村悠季³
フジクラ電装株式会社 望月 淳⁴

Corrosion Behavior of Aluminum Wire at Crimped Terminal and Impact on Performance

T. Kawaguchi, A. Kimura, K. Fukaura, Y. Nakamura, and M. Mochizuki

自動車の軽量化需要に対し、われわれはワイヤハーネスの軽量化に注目し、電線の導体をアルミニウム化することに取り組んでいる。アルミニウムは腐食環境下において異種金属との間でガルバニック腐食を生じやすいため、アルミ電線を車両に搭載するためには端子圧着部で起こるガルバニック腐食を防止する必要がある。本報告では、最適な防食方式を具現化するための基盤となる、アルミ電線の腐食挙動解明に関するわれわれの取り組みについて報告する。

We focus on reducing weight of wiring harnesses by using aluminum instead of copper as conductors of electrical wires to comply with the demand for weight reduction of vehicles. Since aluminum causes galvanic corrosion when it is in electrical contact with a different metal in an electrolyte, it is essential to prevent this phenomenon from occurring at crimped terminals in mounting aluminum wires on vehicles. This report describes our efforts in studying corrosion behavior of aluminum wires at crimped terminals to develop an effective anti-corrosion treatment.

1. ま え が き

近年、各国の自動車CO₂規制の厳しさが増している¹⁾ことなどを背景に、燃費向上の観点からカーメーカ各社が自動車の軽量化に取り組んでいる。自動車を軽量化する手段の一つとして、車両当たり約30kgの重量があるワイヤハーネス²⁾の軽量化は有効な手段であり、その方法の一つにアルミ電線の使用があげられる。従来のワイヤハーネスには導体に銅を使用した銅電線を用いるのが一般的であるが、比重が銅のおよそ1/3であるアルミニウムを導体として使用することでワイヤハーネスの軽量化が可能となる。しかし、電線の導体として銅の代わりにアルミニウムを使用するためには、銅とアルミニウムの性質の違いに起因する問題に適切に対処する必要がある。例えば、アルミニウムの電気伝導率は銅のおよそ60%であるために同量の電流を流すためには、導体断面積が大きくなってしまふといった問題や、アルミニウム

表面の酸化被膜が銅よりも強固であるために、端子と導体間の電氣的接続を安定して得ることが銅よりも困難となること、さらにアルミニウムは貴な金属との間でガルバニック腐食が起こりやすいといった問題がある。これらの問題の中から、本報告ではアルミニウムのガルバニック腐食に焦点を当てる。ガルバニック腐食とは、貴電位の金属と卑電位の金属とが電氣的に接続された状態にあると、卑電位の金属が腐食する現象である³⁾。従来使用されてきた自動車用端子は材質が銅合金であることが一般的であり、端子をアルミ電線に接続した場合には銅とアルミニウムの電位差の違いにより、端子接続部でガルバニック腐食が起こる可能性がある。端子接続部でガルバニック腐食が発生した場合、アルミ電線の電氣的性能や機械的性能に悪影響を及ぼす可能性があるため、アルミ電線の端子圧着端末部には適切な防食処理が必要となる⁴⁾。適切な防食処理を具現化するためには、端子圧着端末部においてガルバニック腐食がどのように進行し、アルミ電線の性能にどのような影響を与えるのかを把握する必要がある。そこで本報告では、特定の腐食環境下におけるアルミ電線端子圧着端末部の腐食挙動と腐食がアルミ電線の性能に与える影響を調査した結果について報告する。

1 車載電源システム開発部
2 材料研究部グループ長
3 材料研究部
4 技術支援課課長

略語・専門用語リスト		説明
略語・専門用語	正式表記	
SEM-EDS	Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectrometry	電子線照射により発生する特性X線を検出し、エネルギーで分光することによって、元素分析や組成分析を行う手法。
μFT-IR	Micro Fourier Transform Infrared Spectrometer	赤外光を照射し、透過または反射した光量を測定して物質定性・同定に関する有効な情報を得る手法。
WB	Wire Barrel	圧着端子の部位の一つで導体を圧着する部位。
InB	Insulation Barrel	圧着端子の部位の一つで絶縁体を圧着する部位。
SEM	Scanning Electron Microscope	電子線を絞って電子ビームとして対象に照射し、対象物から放出される二次電子、反射電子(後方散乱電子, BSE)、透過電子、X線、カソードルミネッセンス(蛍光)、内部起電力等を検出する事で対象を観察する装置。
X線CT	X-ray Computed Tomography	放射線などを利用して物体を走査しコンピュータを用いて処理することで、物体の内部画像を構成する技術、あるいはそれを行うための機器。

2. 実 験

腐食処理スキームを図1に示す。アルミ電線はALVUS 0.75 sq⁵)を使用し、自動車用端子(銅合金製、スズめっき)をF型圧着した。まず、6±1%の塩化ナトリウム水溶液を作製し、アルミ電線の端子圧着端末部を完全に浸漬させた。塩化ナトリウム水溶液からアルミ電線を取り出した後、温度 80℃±5℃、湿度 95%±5%の環境下に任意の時間放置した。接続部の電気的性能の変化を確認するために腐食処理中に抵抗値測定を実施し、機械的性能の変化を確認するために腐食処理前後に引張試験を実施した。



図2 腐食処理前後の端子圧着端末部の外観
Fig. 2. Appearance of aluminum wires atrimped terminal.

3. 結果と考察

3.1 端子圧着端末部の変化

腐食処理前後の端子圧着端末部の外観を図2に示す。図2より、腐食試験後は白い付着物が端子圧着端末部に確認された。そこで、付着物を同定すべく、SEM-EDSによる元素分析とμFT-IRによる分析を実施した。元素分析の結果を表1に示す。元素分析の結果、付着物はC、

表1 付着物の元素分析結果
Table 1. Elemental analysis results of adherents.

Element	Mass concentration (%)
C	5.30
O	63.45
Al	25.03
Cl	6.22

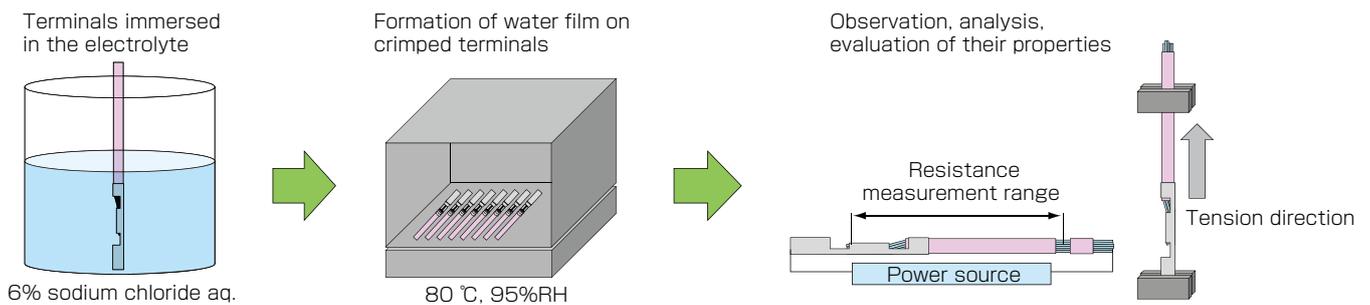


図1 腐食処理スキーム
Fig. 1. Test procedures.

O, Al, Clで構成されていることがわかった。次に、付着物の μ FT-IRスペクトルを図3に示す。アルミニウムの腐食生成物としては、Boehmite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Diaspore ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Bayerite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), Hydrargillite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) などがあるが^{6),7)}, 図3から付着物はBoehmiteに特徴的な 1070 cm^{-1} 付近の吸収帯⁸⁾を示しており、このことから付着物はBoehmiteを含んでいることが示唆された。以上の分析結果から、確認された付着物はアルミニウムの腐食に起因するものであり、端子圧着端末部で腐食が発生したと考えられる。

次に、腐食処理前後の端子圧着部の断面を図4に示す。図4より、WBの先端部分およびWBとInBの間に位置する部分でアルミニウムの一部が消失していることが確認された。一般に、端子は銅板にスズめっきを施した後にプレス金型で打ち抜いてから曲げ加工などを行うなどして作製するため、図4で矢印によって示した端子の端面部分は銅が露出した状態になっている。また、アルミニウムの消失が確認された位置ではアルミニウムが露出しており、外界から水分や電解質が付着しやすい状態になっている。これらのことから、アルミニウムの消失が確認された位置はガルバニック腐食の発生条件が揃いやすい環境であると言える。以上の結果をふまえて、圧着部の腐食過程を図5のように考えた。まず、塩化ナト

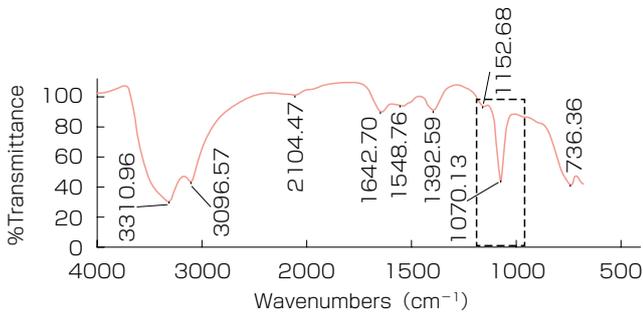


図3 付着物の μ FT-IRスペクトル
Fig. 3. μ FT-IR spectrum of adherents.

リウム水溶液に浸漬することによって端子圧着端末部に電解質が付着する。その後、高温高湿環境下に置かれたことで圧着部表面に薄い水膜が形成され、銅とアルミニウムが電氣的に接続されることでガルバニック腐食が起こる。このとき、アルミニウムおよび銅の両方が露出しており、電解質溶液によるアルミニウムと銅の電氣的接続が形成されやすい部分からガルバニック腐食が起こったために、図4に示したような位置でアルミニウムの腐食が起こったと考えられる。

3.2 電氣的性能への影響

図6に腐食処理中の接続部の抵抗値測定結果を示す。図6より、抵抗値は急激な上昇と緩やかな上昇という2つの傾向を示すことが確認された。今回測定した端子圧着端末部の抵抗値は、圧着部における端子と導体間の接触抵抗と電線の導体抵抗を抵抗成分として含んでいる。このことから、抵抗値の上昇挙動に違いが生じた理由は圧着部の状態の違いに起因するのではないかと考え、X線CTによる観察を実施した。図7に抵抗値を測定したサンプルの圧着部のX線CT画像を示す。図7より、サン

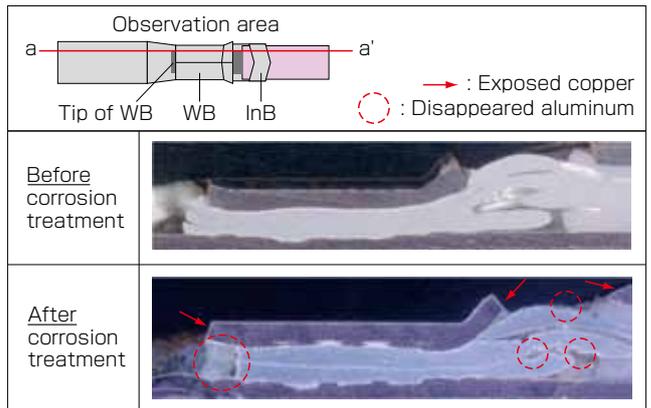


図4 腐食試験前後の端子圧着部断面
Fig. 4. Cross-sectional images of aluminum wires before and after corrosion treatment.

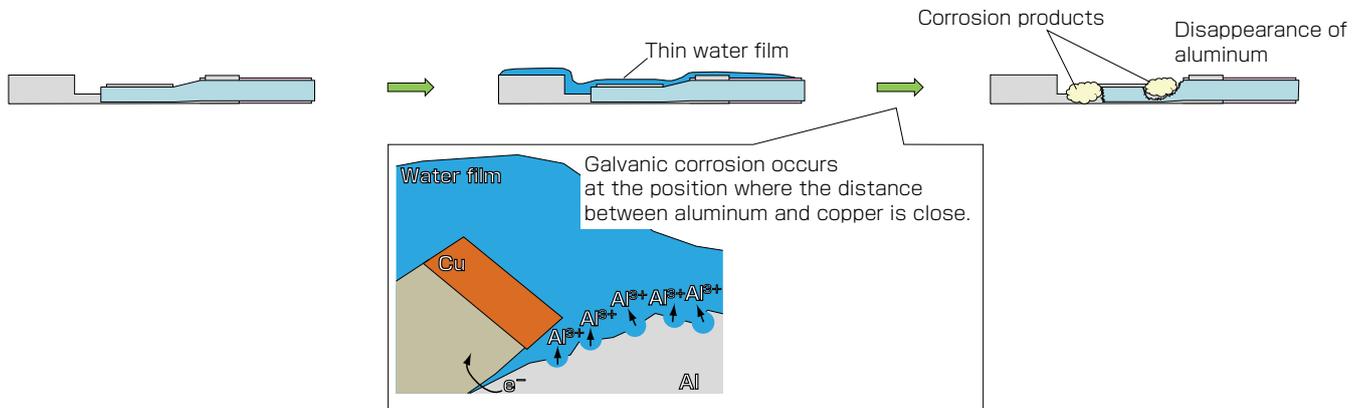


図5 圧着端末部の腐食過程
Fig. 5. Corrosion behavior of aluminum wires at crimped terminal.

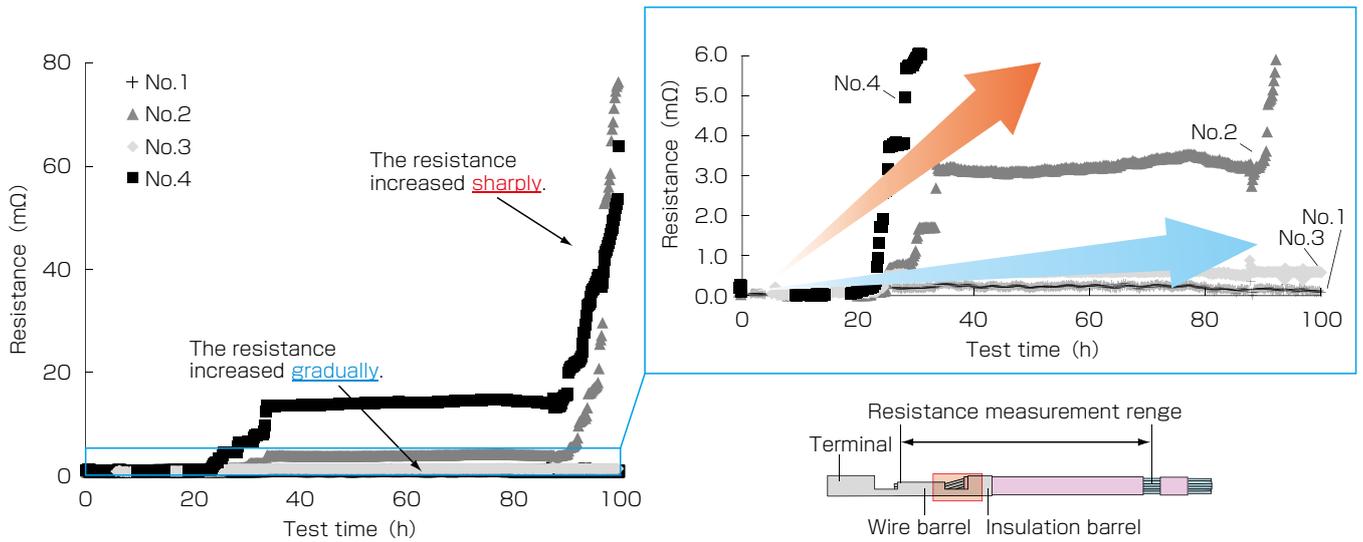


図6 抵抗値測定結果
Fig. 6. Results of resistance measurement.

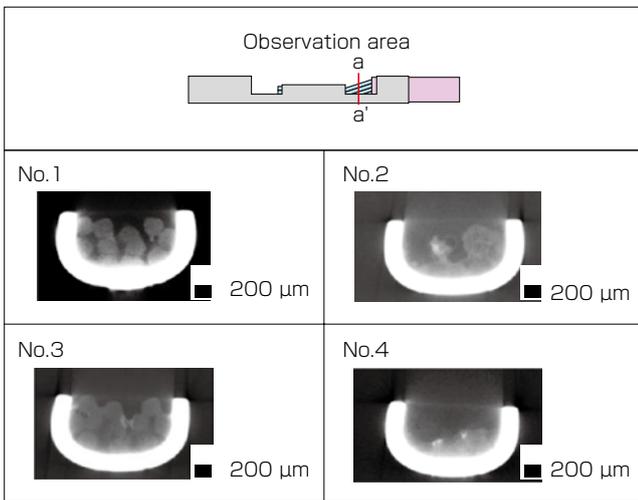


図7 圧着部のX線CT画像
Fig. 7. X-ray CT images of aluminum wires at crimped terminal.

プルNo.1 およびNo.3 はアルミ素線の形が確認できるのに対し、サンプルNo.2 とサンプルNo.4 はアルミ素線の形が確認できない状態であり、圧着部のアルミ導体の状態に違いがあることが確認された。また、抵抗値測定結果とX線CT測定結果の結果から、圧着部においてアルミ素線が確認できたサンプルは抵抗値上昇が緩やかであり、アルミ素線が確認できないサンプルについては抵抗値上昇が急激であることが確認された。以上のことから、圧着部のアルミ導体の腐食状態はアルミ電線の抵抗値上昇に影響し、アルミ電線の電気的性能を劣化させることが示唆された。

3.3 機械的性能への影響

図8に腐食処理前後のアルミ電線の引張試験結果を示す。図8より、腐食処理後のアルミ電線は引張強度が低下することが確認された。また、図9に示したように、

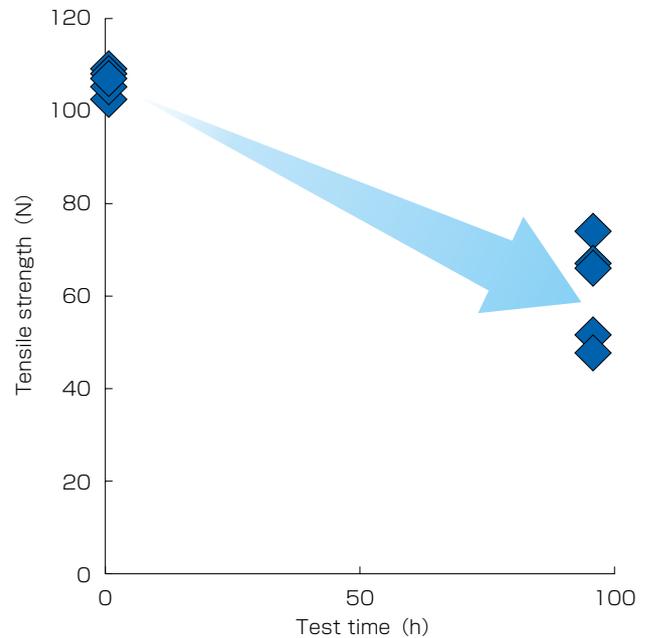


図8 腐食試験前後の引張試験結果
Fig. 8. Tensile test results of aluminum wire before and after corrosion treatment.

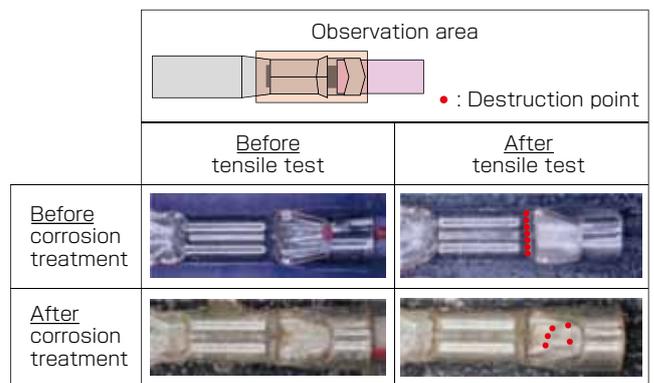


図9 腐食試験前後の引張試験後の外観
Fig. 9. Appearances of aluminum wire after tensile test.

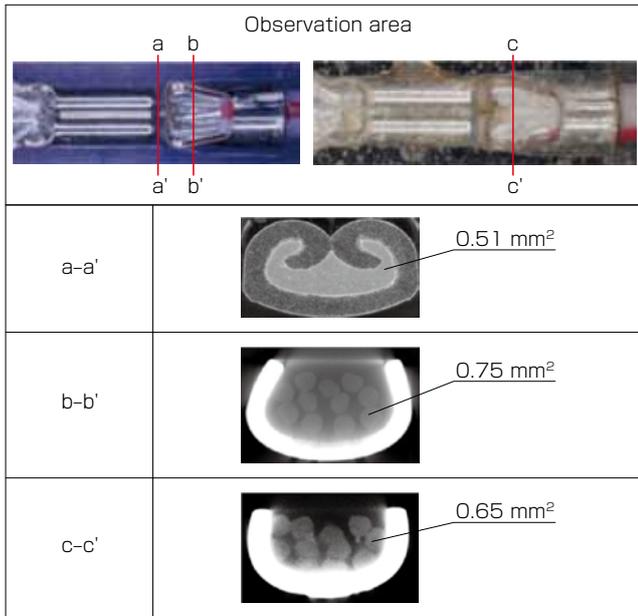


図10 圧着部の断面積算出結果

Fig. 10. Calculation results of cross-sectional area at crimped terminal.

腐食試験前後のアルミ電線では引張試験時の破壊モードが異なることが確認された。腐食試験前のアルミ電線はWB端部のほぼ同じ位置で素線切れが起っていたのに対して、腐食試験後のアルミ電線は素線ごとに破断する位置が異なっていた。一般に、引張強さは断面積に比例するため⁹⁾、最も断面積が小さいWB端部で素線切れが起こることが考えられるが、腐食試験後のアルミ電線ではWB端部での素線切れはなかった。この理由を、腐食試験後のアルミ電線はWB端部の断面積よりもWBとInB間のアルミ素線の総断面積の方が小さくなったためと考え、腐食試験前後のアルミ電線の断面積を算出して比較を行った(図10)。その結果、腐食試験後のアルミ電線はWBとInB間のアルミ素線の総断面積がWB端部の断面積よりも大きいにも関わらずWBとInBの間で素線切れが起きているということが示された。この原因を明らかにすべく、素線破断位置のX線CTによる観察を実施した。腐食試験後のアルミ電線の破断位置の引張試験前のX線CT画像を図11に示す。図11より、素線表面に凹凸構造が形成されていることが確認された。この凹凸構造で応力集中が発生し、破断起点となり、素線が伸びきる前に破断することで総断面積の大きさに関わらず破断が起きたと考えられる。以上のことから、圧着部のアルミ導体の腐食状態はアルミ電線の引張強度低下に影響し、アルミ電線の機械的性能を劣化させることが示唆された。

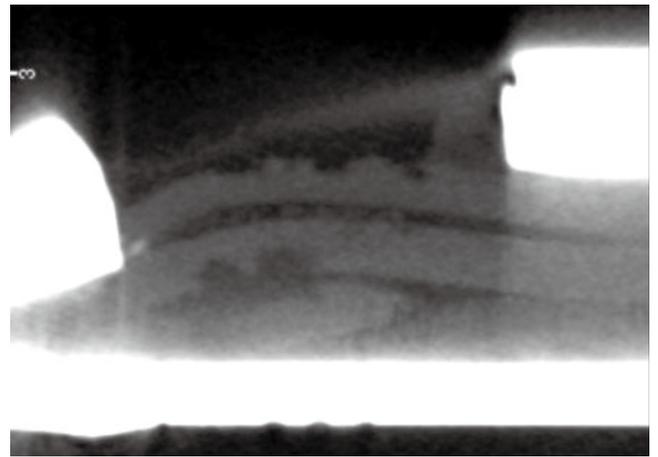


図11 腐食処理後、引張試験前のX線CT画像
Fig. 11. X-ray CT images of aluminum wire before tensile test.

4. む す び

特定の腐食条件下におけるアルミ電線端子圧着部の腐食挙動と、腐食がアルミ電線の電气的性能および機械的性能に与える影響を明らかにした。今後、様々な腐食環境下における腐食挙動調査を進め、腐食環境の違いによる腐食挙動の違いを明らかにし、把握した腐食挙動をふまえてアルミ電線を自動車に搭載するための最適化された防食処理方式を具現化していく。

参 考 文 献

- 1) 西野浩介：「世界の自動車燃費規制の進展と電動化の展望」, pp.6, 2018.
- 2) 大庭清嗣：「次世代自動車用ワイヤハーネス」, フジクラ技報, 第123号, pp.78-82, 2012.
- 3) 腐食防食協会：「腐食・防食ハンドブック第2版」, 丸善株式会社, pp.574, 2005.
- 4) 三好俊充ほか：「新型ロードスターの軽量ワイヤハーネス開発」, マツダ技報, No.32, pp.167-172, 2015.
- 5) 自動車技術会：「自動車部品—アルミニウム低圧電線」, JASO D603, 2016.
- 6) 腐食防食協会：「腐食・防食ハンドブック第2版」, 丸善株式会社, pp.787, 2005.
- 7) M. Pourbaix, "Atlas of electrochemical equilibrium in aqueous solutions," Pergamon Press, 168, 1966.
- 8) 佐藤太一：「水酸化アルミニウムとアルミナについて」, 鉱物学雑誌, 第19巻, 第1号, pp.21-41, 1989.
- 9) 矢島悦次郎ほか：「若い技術者のための機械・金属材料」, 丸善株式会社, pp.96-97, 2002.